



ESTUDIO COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE MARCOS DE ACERO REHABILITADOS CON CONTRAVIENTOS RESTRINGIDOS CONTRA PANDEO: MÉTODO DE FUERZAS CONTRA MÉTODO DE DESPLAZAMIENTOS

Amador Terán Gilmore¹ y Jorge Ruiz García²

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio analítico con la finalidad de evaluar la pertinencia de utilizar un sistema de contravientos restringidos contra pandeo como esquema de refuerzo para edificios existentes de acero. Con este propósito, se diseñan sistemas de contravientos para reforzar cuatro marcos de acero conforme a los requerimientos de metodologías de diseño basadas en fuerzas y desplazamientos. Cada marco bajo consideración se sujeta, antes y después de ser reforzado, a un grupo de acelerogramas registrados en estaciones ubicadas en suelo firme. Se observa que los contravientos restringidos contra pandeo permiten una reducción sustancial de las demandas máximas de distorsión de entrepiso en los marcos. Mientras que el efecto benéfico de los contravientos no puede ser totalmente controlado a través del enfoque basado en fuerzas, el enfoque basado en desplazamientos permite controlar explícita y adecuadamente el nivel de daño estructural en los marcos a partir de un control eficiente de sus deformaciones laterales.

ABSTRACT

This paper presents an analytical study aimed at evaluating the feasibility of using buckling-restrained braces as a retrofit scheme in existing multi-bay multi-story steel buildings. For that purpose, the seismic response of four two-dimensional frame models representative of typical steel buildings designed in a region of high seismicity was analyzed prior and after including buckling-restrained braces as a retrofit strategy. The braces were designed following force-based and displacement-based approaches. Each frame was subjected to a set of earthquake ground motions recorded on accelerographic stations located on firm soil sites. It was observed that buckling-restrained braces allow for an efficient reduction of the peak inter-story drift demands in the retrofitted frames. However, since the beneficial effect of the braces cannot be fully controlled under a force-based design approach, it is concluded that a displacement-based design approach is the best option to achieve adequate damage control for the different performance levels.

MOTIVACIÓN

Varias técnicas, tal como el encamisado con concreto reforzado y acero, y la adición de muros y/o contravientos, han sido utilizadas para rehabilitar edificios que han experimentado daño estructural durante sismos severos, o para el refuerzo de edificios existentes que no cumplen con los requisitos de sismorresistencia planteados por los códigos actuales. Entre estas técnicas, el contraventeo con diagonales de acero ha sido considerado como una de las alternativas más atractivas para incrementar la resistencia y rigidez lateral de edificios existentes de varios pisos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los contravientos tradicionales, ya sean dúctiles o no, tienden a exhibir pandeo global cuando están sujetos a esfuerzos de compresión, lo que resulta en pandeo local, fractura del material base, y en un comportamiento histerético altamente inestable cuando se les sujeta a cargas cíclicas (Bertero et al. 1994, Uriz y Mahin 2008). Bajo estas circunstancias, una sismorresistencia adecuada solo puede lograrse a través de un diseño

¹ Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 México, D.F.

² Profesor, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edif. C Planta Baja, Cd. Universitaria, 58040 Morelia, Mich. Teléfono: (443)304-1002x108; jruizgar@stanfordalumni.org

conservador, o más racionalmente, a través de combinar la eficiencia de las diagonales metálicas con mecanismos innovadores que restrinjan su pandeo.

El concepto de contravientos restringidos contra pandeo fue introducido hace casi treinta años en Japón (Uang and Nakashima, 2003). La idea tras un contraviento restringido contra pandeo es fabricar un elemento estructural que trabaje a compresión sin exhibir problemas de pandeo. Dado que los contravientos suelen trabajar de una manera estable a tensión, el contraviento restringido contra pandeo es un dispositivo capaz de disipar energía de manera estable en presencia de varios ciclos de carga reversible. Conforme se ilustra en la Figura 1, un contraviento restringido contra pandeo está formado por los siguientes componentes: A) Un núcleo de acero que disipa energía a través de su extensión o contracción axial, B) Material confinante que restringe el pandeo del núcleo, y C) Camisa de acero que mantiene la integridad del material confinante y aporta mayor restricción contra pandeo. Bajo la acción de un sismo severo, se espera que sólo fluya el núcleo del contraviento. El núcleo de acero se desadhiere del mortero o concreto confinante; es decir, se minimiza cualquier contacto en la interface entre ambos materiales. Esto con el fin de evitar que la resistencia a compresión del contraviento sea significativamente mayor que su resistencia a tensión. Las pruebas experimentales de contravientos restringidos contra pandeo indican un comportamiento altamente estable ante cargas severas del tipo cíclico. Una discusión extensa del concepto y desempeño de contravientos restringidos contra pandeo puede encontrarse en Uang y Nakashima (2003).

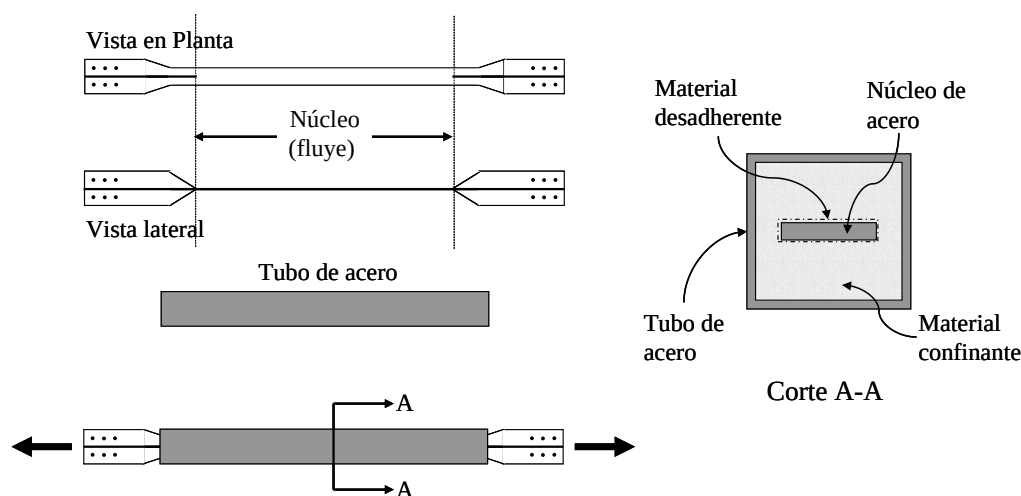


Figura 1 Configuración esquemática de un contraviento restringido contra pandeo

Aunque originalmente el uso práctico de los contravientos restringidos contra pandeo se enfocó a proveer sismorresistencia a edificaciones nuevas; estos elementos estructurales han sido utilizados recientemente para reforzar edificios existentes (Ash y Bartoletti 2009, Di Sarno y Manfredi 2009). Dentro de este contexto, el objetivo principal de este artículo es estudiar la efectividad de un sistema de contravientos restringidos contra pandeo para reforzar una serie de marcos momento-resistentes de acero representativos de edificios existentes de acero. En particular, se ilustran y discuten las ventajas de utilizar un enfoque basado en desplazamientos como alternativa a un enfoque basado en fuerzas para el dimensionamiento de los contravientos.

MARCOS DE ACERO

Conforme a lo ilustrado en la Figura 2, en este estudio se consideraron cuatro marcos de acero de tres crujías y diferente número de pisos (dos con cuatro y dos con ocho pisos). Los marcos, considerados representativos de marcos momento-resistentes exteriores encontrados en edificios típicos de oficinas en los EE.UU., fueron originalmente diseñados por Santa-Ana y Miranda (2000). Mientras que una primera familia está compuesta por marcos rígidos; una segunda familia incluye marcos flexibles.

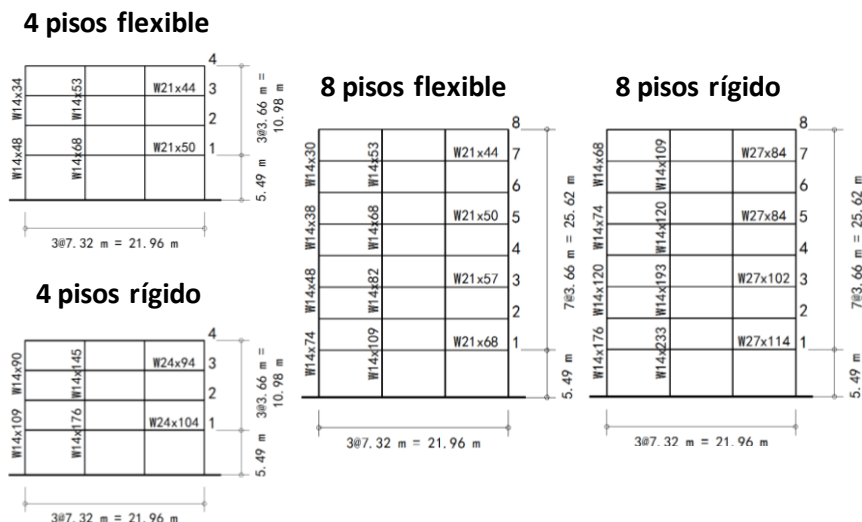


Figura 2 Marcos momento-resistentes de acero considerados en este estudio

Los marcos, que se diseñaron conforme a la versión 1994 del *Uniform Building Code*, se modelaron como marcos planos a través del programa RUAUMOKO (Carr 2004). Se asignó, a través de una matriz de amortiguamiento de Rayleigh, un amortiguamiento del 5% del crítico a los primeros dos modos de vibrar de cada marco. Mientras que se consideraron los efectos $P-\Delta$ globales, los efectos $P-\delta$ locales no se incluyeron durante el análisis. Las vigas y columnas se modelaron como elementos barra que concentran su respuesta inelástica en articulaciones plásticas ubicadas en sus extremos. Mientras que para las columnas se consideró un comportamiento elasto-plástico no degradante que considera la interacción *fuerza axial-momento flexionante* para su relación momento-curvatura, esta relación en el caso de las vigas consideró un comportamiento elasto-plástico con degradación de resistencia que representa el fenómeno de fractura de acuerdo a lo discutido por Filiatrault et al. (2001). La capacidad a flexión de vigas y columnas se determinó a partir de los esfuerzos esperados de fluencia de los aceros utilizados para su fabricación, los cuales se consideraron iguales a 3300 y 4000 kg/cm², respectivamente.

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Se consideró un conjunto de veinte movimientos del terreno correspondientes al área urbana de la ciudad de Los Angeles, California. Dichos movimientos fueron establecidos como parte del proyecto *FEMA/SAC Steel Project* (Somerville et al. 1997) para representar al sismo de diseño para terreno firme y una tasa de excedencia de 10% en 50 años. La Figura 3 muestra espectros elásticos de pseudo-aceleración y desplazamiento, que corresponden a la media más una desviación estándar (σ), calculados para el conjunto de movimientos. Puede notarse que la ordenada máxima en el espectro de resistencia corresponde a un periodo cercano a los 0.4 segundos, y que el espectro de desplazamientos muestra un incremento prácticamente lineal de desplazamiento con el periodo.

REFUERZO DE LOS MARCOS DE ACERO

Conforme a lo que se muestra esquemáticamente en la Figura 4 para un marco de cuatro pisos, el refuerzo de los marcos consiste en la adición de dos contravientos configurados en forma de “V” invertida en la crujía central de cada piso. Para los análisis dinámicos no lineales de los marcos reforzados, los contravientos restringidos contra pandeo se modelaron como resortes axiales. La rigidez axial de cada uno de estos resortes se estimó como:

$$k_b = \frac{1.5E_b A_b}{L_b} \quad (1)$$

donde E_b y A_b son el módulo de elasticidad y el área del núcleo del contraviento restringido contra pandeo, respectivamente, y L_b su longitud total. El valor de 1.5 en la Ecuación 1 considera la existencia de placas de conexión y las mayores áreas en los extremos de los contravientos restringidos contra pandeo. Además, se supuso un comportamiento elasto-plástico para caracterizar la relación *fuerza axial –desplazamiento axial* de cada resorte. Dado que la investigación experimental ha mostrado que los contravientos restringidos contra pandeo exhiben una resistencia axial a compresión ligeramente mayor que su resistencia a tensión, se asumió que la resistencia a compresión axial de cada resorte es 2% mayor que su correspondiente resistencia a tensión. En este estudio, el esfuerzo de fluencia del acero usado para fabricar los núcleos de los contravientos se supuso 10% mayor que su correspondiente esfuerzo nominal, el cual se consideró igual a 2530 kg/cm².

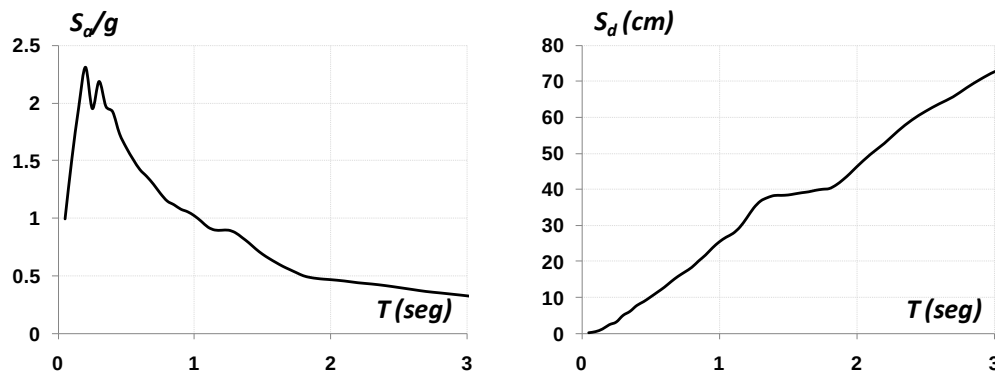


Figura 3 Espectros de aceleración normalizada y desplazamiento correspondientes al conjunto de movimientos considerados en este estudio

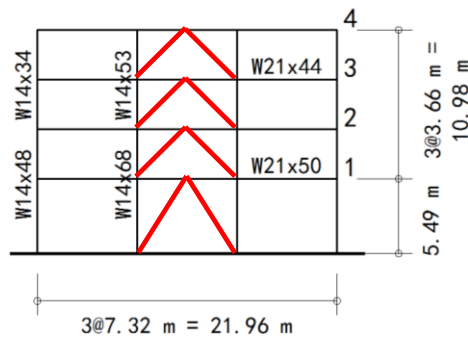


Figura 4 Configuración del sistema de contravientos para un marco de cuatro pisos

ENFOQUE BASADO EN FUERZAS

Dentro del contexto del enfoque basado en fuerzas, que representa el estado de la práctica en términos de diseño sismorresistente, los contravientos se diseñaron para resistir la totalidad de las cargas laterales de diseño. En estos términos, el proceso de diseño se centró en definir un área para el núcleo de los contravientos que sea capaz de resistir en su totalidad la distribución equivalente de fuerzas laterales en altura que corresponde a cada marco. Se utilizó un procedimiento de tres pasos para determinar el área de contravientos:

- 1) Se establecen las cargas laterales equivalentes en altura a través del espectro de diseño de resistencia y la siguiente ecuación (Federal Emergency Management Agency 2000)



$$F_i = V_b \frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^N w_j h_j^k} \quad (2)$$

donde V_b es el cortante basal de diseño, w_i el peso del i -ésimo piso, h_i la altura medida respecto al nivel del terreno del i -ésimo piso, N el número total de pisos, y k un parámetro que toma en cuenta el efecto de modos superiores, y que se define como:

$$k = \begin{cases} 1 & T_1 \leq 0.5 \text{ seg} \\ (T_1 + 0.5)/2 & 0.5 \leq T_1 < 2.5 \text{ seg} \\ 2 & T_1 \geq 2.5 \text{ seg} \end{cases} \quad (3)$$

donde T_1 es el periodo fundamental de vibración del marco. El espectro medio + σ de resistencia, mostrado en la Figura 3 se utilizó para determinar las fuerzas laterales equivalentes. Para establecer las fuerzas laterales de diseño se utilizó un factor de reducción de resistencia, R , igual a 8.

- 2) A partir de las fuerzas F_i , se obtiene la distribución en altura de fuerzas cortantes, V_i .
- 3) A partir de plantear el equilibrio estático del sistema de contravientos, se establece la fuerza axial actuante en cada contraviento del i -ésimo piso:

$$P_i = \frac{V_i}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

donde α es el ángulo de inclinación de las diagonales. El área requerida para las diagonales del i -ésimo piso, A_i , puede estimarse conforme a lo siguiente:

$$A_i = \frac{P_i}{\phi f_y} \quad (5)$$

donde f_y es el esfuerzo de fluencia del acero utilizado para fabricar las diagonales (2530 kg/cm^2) y ϕ un factor de reducción de resistencia igual a 0.9.

ENFOQUE BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

En términos del enfoque basado en desplazamientos, los contravientos se dimensionan de acuerdo a la metodología discutida en detalle por Terán y Virto (2009):

- 1) Se establece una definición cualitativa de desempeño adecuado a través de la consideración explícita de los niveles aceptables de daño en los elementos estructurales del marco contraventeado. En este artículo se considera que los marcos existentes deben permanecer totalmente operables (elásticos) después de la ocurrencia del sismo de diseño, y que los contravientos deben exhibir comportamiento plástico de consideración que les permita disipar un porcentaje significativo de la energía que el sismo induce al marco.
- 2) Se cuantifica el desempeño adecuado a través de establecer umbrales de diseño para la distorsión de entrepiso. Para los marcos bajo consideración, una serie de análisis estáticos no lineales indica que estos permanecen elásticos, y por tanto totalmente operables, para una distorsión de entrepiso de 0.01.
- 3) Se establece, a través del espectro de diseño de desplazamientos, un valor de diseño para el periodo fundamental de vibración del marco contraventeado (T_D), el cual cuantifica a nivel global la rigidez lateral de diseño.
- 4) Se dimensionan los contravientos de acuerdo al valor de T_D .

En forma resumida, puede decirse que las áreas de los contravientos se dimensionaron de tal manera que pudieran controlar su demanda media + σ de distorsión de entrepiso en los marcos dentro del umbral de 0.01 (garantizando con ello un marco totalmente operable después del sismo de diseño). Conforme a lo planteado anteriormente, el esfuerzo de fluencia del acero utilizado para fabricar los contravientos es de 2530 kg/cm², y se considera que el área promedio a lo largo de un contraviento es mayor en 50% que el área correspondiente a su núcleo (para considerar la existencia de placas de conexión y las mayores áreas en los extremos de los contravientos). Una vez que los contravientos fueron dimensionados con base en rigidez, las columnas internas de los marcos (que conforme a lo mostrado en la Figura 4 son las que soportan a los contravientos) se revisan a través de conceptos de diseño por capacidad, de tal manera que el comportamiento plástico se concentre en los contravientos. Debe mencionarse que en términos de resistencia, las columnas existentes de todos los marcos proveyeron un soporte adecuado a los contravientos (no hubo necesidad de reforzar las columnas internas de los marcos).

DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE LOS MARCOS DE ACERO

Se llevaron a cabo una serie de análisis estáticos no lineales de los marcos, y su desplazamiento lateral de azotea fue estimado de acuerdo al *Método de los Coeficientes* planteado por el documento FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency 2000). Mientras que la Tabla 1 resume los valores asignados a los diferentes parámetros y coeficientes involucrados en la estimación de los desplazamientos de azotea, la Figura 5 resume las máximas demandas de distorsión de entrepiso (denominado *IDI*) esperadas en los marcos. En líneas negras se muestran las demandas predichas a partir del *Método de los Coeficientes*, y en líneas grises, aquellas establecidas a partir de análisis dinámicos no lineales que consideran los veinte movimientos del terreno bajo consideración. Para proveer un contexto en cuanto al desempeño de los marcos, las recomendaciones de FEMA 356 especifican para marcos dúctiles de acero umbrales de distorsión de entrepiso de 0.7%, 2.5% y 5% para los niveles de desempeño correspondientes a Ocupación Inmediata, Seguridad de Vida y Prevención de Colapso, respectivamente.

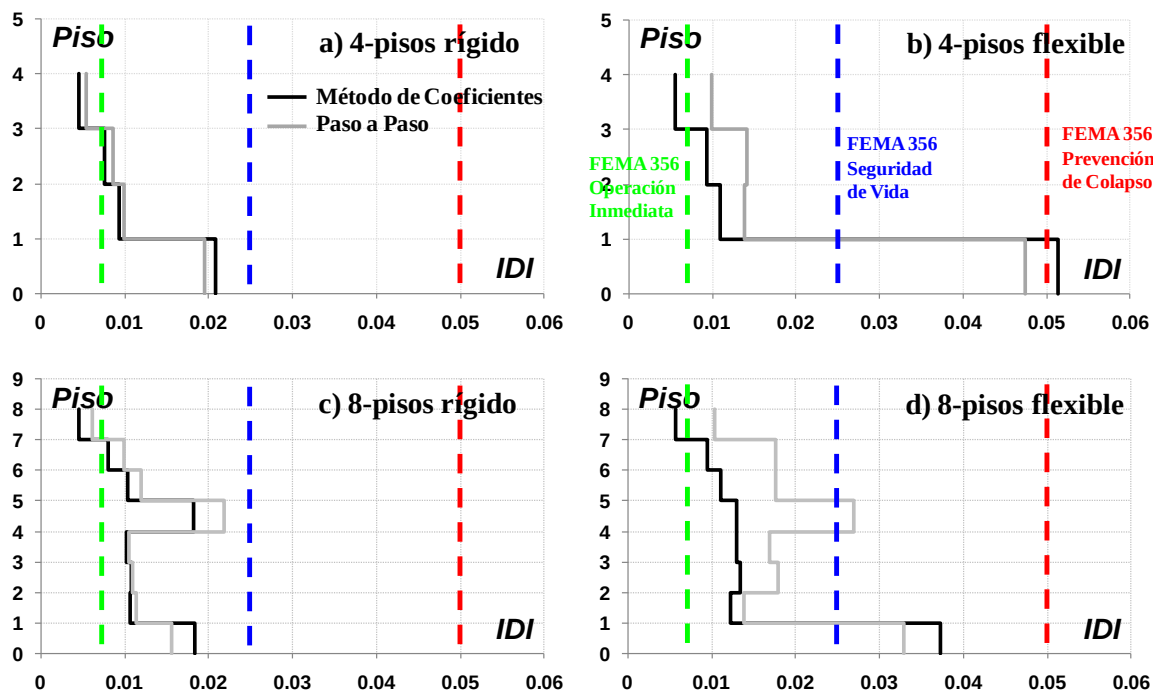


Figura 5 Desempeño esperado de los marcos sin contravientos



Mientras que los marcos rígidos de cuatro y ocho pisos exhiben demandas máximas de distorsión cercanas a 2%; los marcos flexibles de cuatro y ocho pisos exhiben mayores distorsiones de entrepiso. Las excesivas demandas de distorsión de entrepiso que exhiben y el hecho de que forman pisos blandos indican la necesidad de rehabilitar los marcos de acero. Dentro de este contexto, debe considerarse que los análisis estáticos no lineales de los marcos indican que un umbral de 1% de distorsión de entrepiso está asociado a su nivel de desempeño operacional.

Tabla 1 Valor de parámetros y coeficientes involucrados en la estimación del desplazamiento de azotea de los marcos sin contravientos

Marco	T_e (seg)	V_b/W	S_a/g	C_0	C_1	C_2	C_3
4-pisos rígido	0.71	0.84	1.29	1.2	1.0	1.0	1.0
4-pisos flexible	1.24	0.31	0.90	1.1	1.0	1.0	1.0
8-pisos rígido	1.18	0.54	0.89	1.2	1.0	1.0	1.0
8-pisos flexible	1.95	0.23	0.47	1.1	1.0	1.0	1.0

MARCOS REFORZADOS A TRAVÉS DEL ENFOQUE BASADO EN FUERZAS

En la Tabla 2 se indican los periodos de vibración de los marcos contraventeados, T_B , así como el área del núcleo de sus contravientos restringidos contra pandeo. Para evaluar el desempeño sísmico de los marcos contraventeados conforme al enfoque basado en fuerzas, se desarrolló una nueva serie de análisis dinámicos no lineales con el programa RUAUMOKO empleando los mismos movimientos del terreno. La Figura 6 muestra las distribuciones media + σ de las demandas máximas de distorsión de entrepiso para los marcos contraventeados (líneas negras) y los marcos sin contravientos (líneas grises).

Conforme a lo que se esperaba, los sistemas de contraventeo permiten reducir sustancialmente las demandas de distorsión de entrepiso. En particular, los contravientos restringidos contra pandeo conducen a demandas de distorsión de entrepiso que están por debajo del nivel de desempeño correspondiente a seguridad de vida para los marcos flexibles de cuatro y ocho pisos. Se observa una reducción de cerca del 98% y 138% en términos de la demanda pico de distorsión de entrepiso, respectivamente, en dichos marcos. Puede observarse además que los marcos contraventeados exhiben, con excepción del marco flexible de cuatro pisos, una distribución más uniforme en la altura de distorsiones de entrepiso. Esto es particularmente importante para los marcos de ocho pisos, que en su condición original desarrollaban pisos blandos en la planta baja y el quinto piso, respectivamente.

Tabla 2 Propiedades dinámicas de los marcos contraventeados y áreas del núcleo de los contravientos restringidos contra pandeo (enfoque basado en fuerzas)

Marco	T_B (seg)	Área (cm ²)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
4-pisos rígido	0.48	16	10	8	4	-	-	-	-
4-pisos flexible	0.67	11	7	6	3	-	-	-	-
8-pisos rígido	0.80	23	18	16	15	12	10	7	4
8-pisos flexible	1.16	12	9	9	8	7	5	4	2

A pesar de limitar las demandas de distorsión de entrepiso, debe notarse que el diseño de contravientos restringidos contra pandeo conforme al formato tradicional basado en fuerzas no puede controlar el comportamiento esperado de los marcos dentro de un nivel de desempeño específico. En particular, la demanda pico de distorsión de entrepiso, cercanamente relacionada con el desempeño esperado de los marcos, tiende a ser diferente para cada marco.

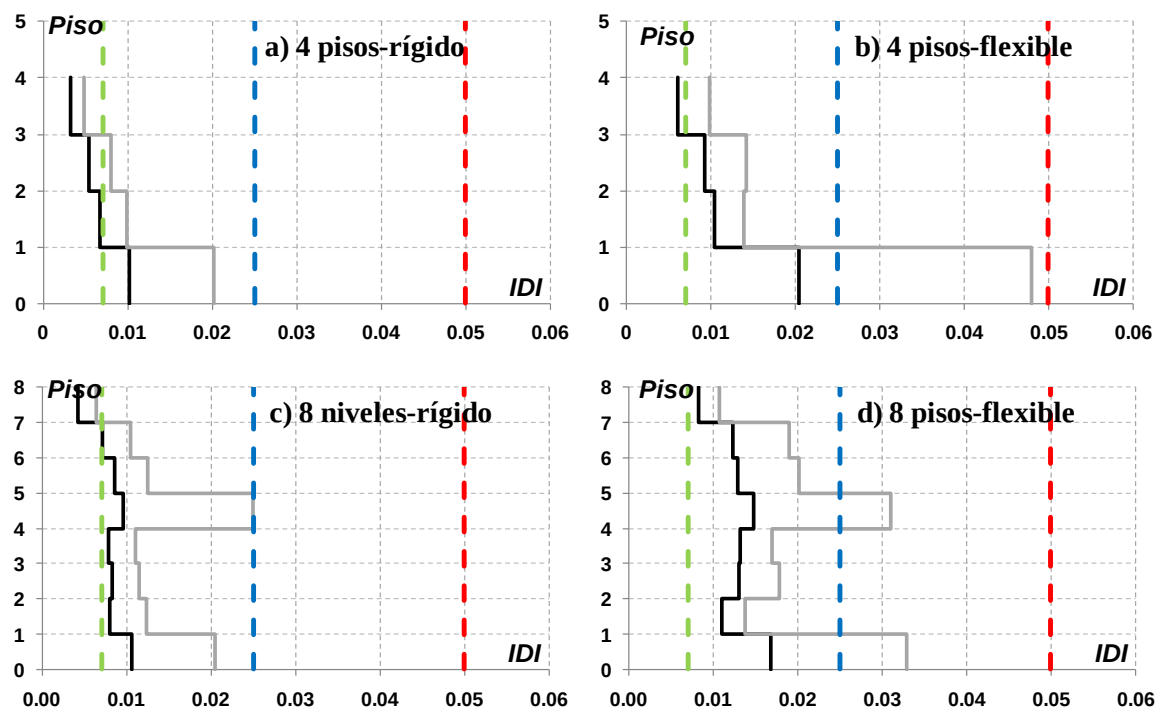


Figura 6 Desempeño esperado para los marcos contraventeados mediante el enfoque basado en fuerzas

MARCOS REFORZADOS A TRAVÉS DEL ENFOQUE BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

En esta etapa, se llevaron a cabo análisis dinámicos no lineales de los marcos contraventeados de acuerdo al enfoque basado en desplazamientos. Mientras que la Tabla 3 compara el periodo fundamental de vibración de diseño con aquel estimado en los marcos contraventeados y resume el área del núcleo de sus contravientos; la Figura 7 resume sus demandas media + σ de distorsión de entrepiso. T_D denota el periodo para el que se diseñaron los sistemas de contravientos, y T_{CR} el periodo fundamental de vibración que los marcos exhibirían si la deformación axial de las columnas que proveen soporte a los contravientos fuera restringida. Aunque la metodología propuesta resulta en valores muy similares de T_{CR} y T_D , el hecho es que las columnas de soporte de los marcos si sufren deformaciones axiales debido a los esfuerzos axiales que en ellas inducen los contravientos. Lo anterior resulta en que los marcos contraventeados exhiban una deformación global a flexión que no es considerada explícitamente por la metodología. Debido a esto, los periodos de vibración reales de los marcos contraventeados T_R son ligeramente mayores a sus correspondientes valores de T_D . Note que la diferencia entre los valores de T_R y T_D no amerita un redimensionado de los contravientos.

En el caso del marco flexible de ocho pisos, la flexibilidad axial de sus columnas internas resultó en un T_R de 0.86 segundos. El valor de 0.77 segundos considerado para este marco en la Tabla 3 se obtuvo por medio de incrementar el área de sus columnas internas (de soporte) en 150%. Esto ilustra las limitaciones que exhibe la metodología utilizada aquí para el caso de edificios altos. Terán y Coeto (2010) discuten las adaptaciones requeridas por la metodología para incorporar las deformaciones globales a corte en el diseño del marco contraventeado.

DISCUSIÓN

Es de interés comparar el peso y el desempeño sísmico de marcos similares en que los contravientos restringidos contra pandeo aportan un porcentaje diferente de su rigidez lateral. Para ello, considere el caso de los sistemas de contraviento diseñados conforme al enfoque basado en desplazamientos para los marcos rígido y flexible de cuatro pisos. Mientras que en el primer caso los contravientos aportan cerca del 70% de la

rigidez lateral total del marco contraventeado, en el segundo caso, este porcentaje esta cercano al 90%. En términos del peso de los marcos, las vigas y columnas de los marcos rígido y flexible de cuatro pisos pesan 25.8 y 11.2 toneladas, respectivamente. El peso estimado para sus contravientos y conexiones es de 1.3 y 1.9 toneladas, respectivamente, de tal manera que el peso total de los elementos estructurales de ambos marcos es 27.1 y 13.1 toneladas, respectivamente. A pesar de que una vez contraventeados, los marcos rígido y flexible exhiben una relación de dos a uno en términos de peso, ambos resultan en un desempeño estructural adecuado. Los resultados similares que se obtuvieron para los marcos de ocho pisos indican claramente la eficiencia del uso de contravientos dentro de un formato basado en desplazamientos para controlar la respuesta lateral de estructuras existentes, e indica que su eficiencia se incrementa de manera importante conforme se incrementa la flexibilidad de la estructura existente.

Tabla 3 Propiedades dinámicas de los marcos contraventeados y áreas del núcleo de los contravientos restringidos contra pandeo (enfoque basado en desplazamientos)

Marco	T_D (sec)	T_{CR} (seg)	T_R (seg)	Área (cm ²)							
				1	2	3	4	5	6	7	8
4-pisos rígido	0.45	0.44	0.45	21	12	9	5	-	-	-	-
4-pisos flexible	0.45	0.45	0.48	29	19	14	8	-	-	-	-
8-pisos rígido	0.70	0.70	0.74	36	22	20	18	16	13	9	5
8-pisos flexible	0.70	0.70	0.77	43	30	28	25	22	18	13	7

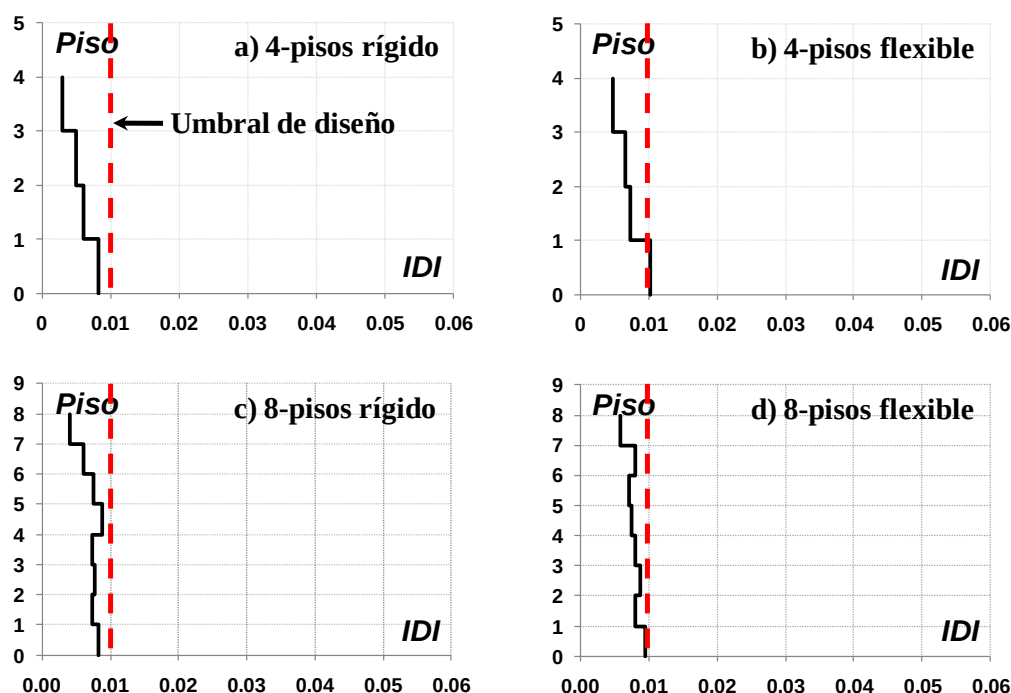


Figura 7 Desempeño esperado para los marcos contraventeados mediante el enfoque basado en desplazamientos

CONCLUSIONES

Este artículo presenta un estudio analítico con el fin de evaluar la pertinencia de utilizar contravientos restringidos contra pandeo como esquema de refuerzo para edificios de acero con varias crujías y pisos. Los contravientos se diseñaron conforme a enfoques basados en fuerzas y desplazamientos. El estudio indica que los contravientos restringidos contra pandeo diseñados de acuerdo a ambos enfoques representan una opción

atractiva para reforzar edificios de acero; sin embargo, el enfoque basado en desplazamientos tiene la ventaja sobre el tradicional de fuerzas en que permite al diseñador controlar el desempeño esperado de la estructura reforzada.

AGRADECIMIENTOS

Mientras que el primer autor quisiera expresar su gratitud a la *Universidad Autónoma Metropolitana* por el apoyo recibido, el segundo autor hace lo propio a la *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.

REFERENCIAS

Ash C., y Bartoletti S. (2009), **“Seismic Rehabilitation of an Existing Braced Frame Hospital Building by Direct Replacement with Buckling-Restrained Braces”**, ATC & SEI 2009 Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures (CD), Artículo 68.

Bertero V.V., Anderson J.C., y Krawinkler H. (2004), **“Performance of steel building structures during the Northridge earthquake”**, Reporte EERC 94/09, Universidad de California en Berkeley.

Carr A. J. (2004), **“RUAUMOKO-Inelastic Dynamic Analysis Program”**, Manual de Usuario, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Canterbury.

Di Sarno L., y Manfredi G. (2009), **“Seismic retrofitting of existing RC frames with buckling restrained braces”**, ATC & SEI 2009 Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures (CD), Artículo 741.

Filiatrault A., Tremblay R., y Wanitkorkul A. (2001), **“Performance evaluation of passive damping systems for the seismic retrofit of steel moment-resisting frames subjected to near-field ground motions”**, Earthquake Spectra, 17(3), 427-456.

Federal Emergency Management Agency (2000), **“Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”**, Reporte FEMA 356, Washington, D.C.

Santa-Ana P.R., y Miranda E. (2000), **“Strength-reduction factors for multi-degree-of-freedom systems”**, Doceavo Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica (CD), Auckland, Nueva Zelanda, Artículo 1446.

Somerville P.G., Smith N., Punyamurthula S., y Sun, J. (1997), **“Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project”**, Reporte SAC/BD-97/04, SAC Joint Venture.

Teran-Gilmore A. y Coeto G. (2010), **“Displacement-based preliminary design of tall buildings stiffened with a system of buckling-restrained braces”**, Earthquake Spectra, artículo aceptado para publicación.

Teran-Gilmore A. y Virto-Cambray N. (2009), **“Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling restrained braces by a displacement-based approach”**, Earthquake Spectra, 25(1), 185-211.

Uang C.M., y Nakashima M. (2003), **“Steel buckling restrained braced frames”**, Earthquake Engineering: From engineering seismology to performance-based design. CRC Press.

Uriz P., y Mahin S.A. (2008), **“Towards Earthquake-Resistant Design of Concentrically Braced Steel-Frame Structures”**, Reporte PEER 2008/08, Universidad de California en Berkeley.

